

基于软件无线电 RTL-SDR 的通信原理实验课程改革

王薇

邯郸学院, 河北 邯郸 056005

DOI: 10.61369/RTED.2025230019

摘 要 : 针对电子信息和通信工程专业的《通信原理》课程, 本文提出了一项基于软件无线电 (SDR) 思想的综合实验教学课程改革方案, 具体采用了低成本且易于获取的 RTL-SDR 硬件。RTL-SDR 能够将普通个人电脑转化为通用的无线电接收机, 使学生能够以低成本、便携的方式探索频谱分析、调制解调以及信道特性等内容, 并结合 Matlab、SDR#、GNU Radio 等工具, 将教学重点从传统的“固定电路验证”转变为“软件定义信号分析”与“系统设计”, 鼓励学生亲手编写代码实现滤波、同步和解码等关键通信功能, 从而积极参与到信号处理算法的实践中。

关 键 词 : 软件无线电 (SDR); RTL-SDR; 通信原理; 实验教学改革; 数字信号处理

RTL-SDR-Based Reform of the Principles of Communications Laboratory

Wang Wei

Handan University, Handan, Hebei 056005

Abstract : Targeting the "Principles of Communications" course for Electronic Information and Communication Engineering majors, this paper proposes a comprehensive experimental teaching reform scheme based on the Software Defined Radio (SDR) paradigm, specifically utilizing the low-cost and accessible RTL-SDR hardware. The RTL-SDR transforms a standard personal computer into a versatile radio receiver, enabling students to explore spectrum analysis, modulation/demodulation, and channel characteristics in a low-cost and portable manner. By combining tools such as Matlab, SDR#, and GNU Radio, the scheme shifts the teaching focus from traditional "fixed circuit verification" to "software-defined signal analysis" and "system design." It encourages students to implement critical communication functions—such as filtering, synchronization, and decoding—through coding, thereby actively engaging them in the practical application of signal processing algorithms.

Keywords : SDR; RTL-SDR; principles of communications; experimental teaching reform; DSP

一、传统实验教学的挑战与改革的必要性

《通信原理》是电子信息工程、通信工程等专业的核心基础课程, 旨在教授学生现代通信系统的基本理论、信号调制解调方法以及系统设计原理。然而, 传统的实验教学普遍存在诸多挑战, 首先, 设备高昂且固化。实验依赖昂贵的专用实验箱或模块, 这些设备功能固定、黑箱化程度高, 学生通常只能进行预设参数下的“验证性”实验, 难以深入理解信号处理的内部机制。其次, 理论与实践脱节。课堂讲授的是连续时间信号、傅里叶变换等高度数学化的理论, 而实验操作往往只是接线和观察波形, 缺乏将抽象理论转化为实时、离散时间处理的工程实践能力。这就导致学生缺乏真实信号的体验, 很少有机会接触和分析真实世界的无线电信号, 对频谱、信道衰落、噪声等概念的感知停留在书本层面。

近年来, 软件无线电 (Software Defined Radio, SDR) 技术为通信实验教学提供了新的路径。国内外学者已进行了一些有益探索, 主要可分为两类: 其一, 基于 USRP (Universal Software Radio Peripheral) 等专业级 SDR 平台构建实验系统。

这类方案性能强大, 但单套设备成本高达数千甚至上万元, 难以实现人手一台的规模化部署, 限制了学生的深度参与和个性化实践, 本质上仍是“高端设备实验室”模式的延续。其二, 出现了利用超低成本 RTL-SDR 的个别实验案例, 这些研究证明了该平台在教学上的可行性, 但多侧重于某个孤立知识点的演示 (如 FM 解调或 ADS-B 信号接收), 缺乏与《通信原理》知识体系相匹配的、贯穿模拟与数字通信的系统性课程改革方案。

因此, 本文的工作旨在弥补上述研究的不足。它并非简单地将 RTL-SDR 作为演示工具, 而是以其为核心, 进行一场彻底的、系统性的实验课程范式重构。本文的创新性主要体现在: 极致的低成本与便携性, 使实验教学得以摆脱固定实验室的束缚; 设计了一套覆盖核心知识链 (模拟调制、数字调制、信道特性) 的综合性实验体系, 强调“系统设计”而非“单点验证”; 将动手编程与实时信号分析置于中心地位, 旨在培养学生将抽象理论转化为代码的硬核工程能力。

软件无线电特别是低成本、高灵活性的 RTL-SDR 设备的出现, 为解决上述问题提供了革命性的解决方案。RTL-SDR 将射频前端与模数转换 (ADC) 功能集成于一个小巧的 USB 设备中,

通过软件（如 GNU Radio、MATLAB 或 Python）实现传统的中频处理和基带处理^[4]，使得学生能够“亲手”构建和解构完整的通信链路。最终将《通信原理》实验从“硬件验证”模式彻底转变为“软件定义信号处理与系统设计”模式，培养学生将通信理论转化为可运行代码的动手能力和实时分析能力。

二、RTL-SDR 在《通信原理》实验教学中的优势

RTL-SDR (Realtek DVB-T dongle) 最初设计用于接收数字电视信号，但其低成本（通常低于 150 元人民币）、宽频率覆盖范围（通常覆盖 25 MHz 至 1.7 GHz）以及开放的软件接口使其成为理想的教学工具。

（一）低成本与便携性

相较于动辄数万元的专业信号源和频谱分析仪，RTL-SDR 的低成本特性使其可以人手一台，实现“随时随地”的实验教学，利用个人笔记本电脑即可进行实验，极大增强了学习的灵活性和积极性。

（二）“白箱”化与实时性

SDR 的核心优势在于其白箱 (White Box) 特性。所有的滤波、调制、解调等功能都通过软件算法实现。学生不仅可以看到算法的数学表达式，还能观察算法在实时运行中对信号样本的每一个步骤，从而深刻理解通信系统的模块化设计和信号流向^[5]。

（三）促进多学科知识融合

SDR 实验强迫学生将通信原理、数字信号处理 (DSP) 和编程语言（如 Python、C++）等多个学科的知识融合起来解决一个实际的工程问题，有效提升了学生的综合工程能力。

三、基于 RTL-SDR 的实验案例设计与实施

本改革方案设计了三个综合实验项目，要求学生利用 RTL-SDR 作为便携式接收或收发前端，结合软件编程实现核心通信功能，强调实时性和动手能力，全面覆盖模拟和数字通信的核心知识点。

（一）实验平台的技术说明与教学考量

为确保实验设计的科学性和可复现性，在此对本实验方案所依托的 RTL-SDR 平台的技术特性与局限进行集中说明，并阐述相应的教学安排。

频率与带宽：本实验主要利用 RTL-SDR 在宽范围内的信号接收能力（如 FM 广播频段、数字电视频段等）。其有限的瞬时带宽（典型值 3.2 MHz）恰好要求学生合理设置采样率，是理解奈奎斯特采样定理的生动案例。

收发功能：RTL-SDR 的纯接收特性决定了其在实验中的角色。对于需要信号发射的实验环节（如实验项目三），采用收发分离的方案：即发射端使用支持发射的 SDR 平台（如 ADALM-PLUTO 或 HackRF），RTL-SDR 仅作为接收机使用。这种组合既发挥了 RTL-SDR 低成本、适于大规模部署的优势，又通过高性能发射端保证了实验信号的可靠性。

（二）项目一：便携式广播信号的实时捕获与解调（模拟通信）

核心知识点：频谱分析、模拟调制 (FM)、超外差接收原理、数字滤波。

教学目标：使学生理解真实无线电环境中的频谱特征，并亲手实现 FM 广播信号的接收、下变频、滤波和解调。

实施步骤：

1. 频谱捕获与分析。学生使用 RTL-SDR 和 SDR# 或 GNU Radio 工具，扫描并捕获本地 FM 广播电台的实时频谱。通过观察载波频率、带宽占用，验证卡森法则和傅里叶变换的实际应用。

2. 软件接收链构建。学生需构建一个完整的接收流程：从 RTL-SDR 采集的复基带 I/Q 数据开始，依次经过低通滤波（降低噪声）、CFO（载波频率偏移）校正、鉴频（如微分 - 乘法或 PLL），最后进行去加重和音频播放。

3. 动手能力体现。要求学生改变解调算法的参数（如鉴频器的积分 / 微分系数、PLL 的环路滤波器带宽），观察对解调音频质量的实时影响，从而深入理解参数选择对系统性能的影响。

（三）实验项目二：BPSK/QPSK 信号的软件定义收发与星座图分析（数字通信）

核心知识点：数字调制 (BPSK/QPSK)、匹配滤波、符号同步、载波同步、星座图。

教学目标：使学生直观理解数字解调的四个核心步骤（匹配滤波、定时、载波同步、判决），并利用星座图实时分析系统的误码性能。

实施步骤：

1. 数字链路搭建：使用两套 SDR（或一台 SDR 发射，另一台 RTL-SDR 接收）搭建低速率数字通信链路，传输 BPSK 或 QPSK 信号。

2. 接收算法实现：学生需在软件中重点实现以下功能：

3. 匹配滤波：使用升余弦滤波器进行脉冲成形滤波，减少符号间干扰 (ISI)^[6]。

4. 定时同步 (Symbol Synchronization)：实现如 Gardner 或早迟门等算法，精确找出最佳采样点。

5. 载波同步 (Carrier Synchronization)：实现如 Costas 环或基于导频的算法，消除相位模糊。

6. 实时星座图分析：在判决前，将同步后的 I/Q 样本实时绘制为星座图^[7]。学生通过人为引入频率偏移、定时误差或信道噪声，实时观察星座点从紧密汇聚到模糊分散的变化过程，直观理解各种非理想因素对数字通信系统的影响。

（四）实验项目三：城市 / 室内无线信道特性测量与误码率分析（信道特性与编码）

核心知识点：无线信道、多径效应、功率延迟谱、误码率 (BER)、信道编码 (CRC)。

教学目标：让学生走出实验室，测量真实环境的无线信道特性，并验证信道编码对改善系统性能的有效性。

实施步骤：

1. 信道测量：使用两台便携式 SDR（一个发送伪随机序列，

另一个接收), 在室内有障碍物、走廊等不同环境下进行测量。通过分析接收信号的自相关函数或计算其功率延迟谱, 量化多径时延扩展, 从而理解信道频率选择性的来源^[8]。

2. BER 基准测试: 在不同信道(如视距 LOS 和非视距 NLOS)下, 计算不加编码的原始数据的误码率(BER), 作为性能基准。

3. 编码增益验证: 在发射端对数据加入简单的循环冗余校验(CRC)编码, 接收端实现解码和检错。在相同信道环境下重新计算 BER^[9]。通过对比编码前后 BER 的显著降低, 验证信道编码抵抗信道损伤的有效性和原理。

四、教学效果评估方案与预期效益

本次课程改革的效果评估将采用混合研究方法, 计划从以下方面收集数据以验证其有效性:

1. 量化数据采集方案: 计划在课程结束后, 对比改革班级与传统教学班级在《通信原理》期末考试中, 针对信号处理、系统设计等题目的得分率。同时, 将制定详细的评分标准, 对学生提交的实验代码/流图的完成度、正确性和创新性进行量化评分。

2. 质性数据采集方案: 课后将进行匿名问卷调查, 重点收集学生对知识理解深度、学习兴趣和工程自信心等方面的主观感受和反馈。

3. 预期效益: 基于 SDR 教学的国际前沿经验和本方案的系统性设计, 预期该改革首先将提升理论到实践的转化能力。学生不再满足于公式推导, 而是能够将傅里叶变换、采样定理、调制解调公式等转化为可执行的 DSP 模块。其次, 培养学生系统级设计思维。通过设计完整的收发流图, 学生能站在系统层面理解各个模块(如滤波器、同步环)之间的相互依赖关系^[10]。最终, 增强学生的未来职业竞争力。掌握 SDR 技术和 GNU Radio/Python 等工具的使用, 为学生未来从事无线通信、信号处理、5G/6G 等前沿领域的工作打下坚实基础。

五、结论

基于 RTL-SDR 的《通信原理》实验课程改革是适应现代通信技术发展趋势的必然选择。它利用低成本、高灵活性的 SDR 平台, 将传统的“验证性”实验转变为“软件定义、实时分析、系统构建”的创新性实践。上述三个实验案例的设计, 不仅全面覆盖了模拟和数字通信的核心知识, 更重要的是, 通过强调便携式操作、实时观察和编程动手实现, 极大地激发了学生的学习兴趣 and 工程实践能力, 有效弥补了传统教学中理论与实践脱节的短板。该改革方案具有极高的推广价值和可行性, 是培养新一代软件定义无线电人才的有效途径。

参考文献

- [1] 王奇, 范山岗, 戴海鸿, 赵海涛, 沈建华. 面向工程能力培养的电子类专业实践教学改革[J]. 实验科学与技术, 2020(06).
- [2] 高翔. “新工科”背景下通信类课程实验实践教学体系研究[J]. 教育教学论坛, 2020(45).
- [3] 王鹏, 王磊, 王晓亮, 王续乔. 通信原理课程模拟通信系统虚拟仿真平台的设计与开发[J]. 实验室科学, 2020(05).
- [4] 傅志中, 李晓峰, 曹永盛, 周宁, 何翔. 通信原理实验教学改革与探索[J]. 实验室研究与探索, 2020(05).
- [5] Proakis, J. G., & Salehi, M. Digital Communications (5th ed.). McGraw-Hill, 2008.
- [6] Harris, F. J. Multirate Signal Processing for Communication Systems. Prentice Hall PTR, 2004.
- [7] 李学华, 王亚飞, 杨尚文, 耿赛猛, 刘磊. 以工程教育认证为导向的“无线通信综合实践”课程方案设计[J]. 实验技术与管理, 2020(04).
- [8] Goldsmith, A. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
- [9] Lin, S., Costello Jr, D. J., & Fosserior, M. P. Error Control Coding (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, 2004.
- [10] 杨宇红, 袁焱, 田砾, 陈大华, 李安琪. 基于软件无线电平台的通信实验教学[J]. 实验室研究与探索, 2015(04).